

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306554

高分辨 THz-TDS 采集传输的嵌入式设计与优化*

张丹丹^{1,2,3} 李璐璐^{1,2,3} 顾 健^{1,2,3} 任姣姣^{1,2,3} 李丽娟^{1,2,3} 张霁旻³ 陈 奇³

(1. 长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022; 2. 长春理工大学光电工程学院 长春 130022; 3. 长春理工大学中山研究院 中山 528400)

摘 要:为了满足太赫兹高分辨检测及实时处理需求,利用光电导天线产生和探测太赫兹时域光谱信号,基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现太赫兹时域光谱的采集、维纳滤波反卷积处理、传输和上位机显示等功能。将采集到的太赫兹时域光谱数据进行维纳滤波反卷积处理,实现还原太赫兹信号、提高时间分辨率以及降噪的效果,将数据由以太网传输的方式传输到上位机进行实时显示,针对实际检测中太赫兹信号反卷积后脉宽较宽,提出在维纳滤波反卷积算法中引入与频率相关的函数对算法进行优化,使信号的脉宽变窄,提高检测精度。优化的维纳滤波反卷积算法处理结果相比于原始算法信噪比增加 7 dB,脉宽降低 0.2 ps,实现更高的检测分辨能力,算法在 FPGA 中实现,精度误差小于 0.7%,处理效率提升 14.29 倍,并且减少后期上位机处理时间。

关键词: 太赫兹; 现场可编程门阵列; 信号采集; 维纳滤波反卷积

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Embedded design and optimization of high-resolution THz-TDS acquisition and transmission

Zhang Dandan^{1,2,3} Li Lulu^{1,2,3} Gu Jian^{1,2,3} Ren Jiaojiao^{1,2,3} Li Lijuan^{1,2,3} Zhang Jiyang³ Chen Qi³

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. Zhongshan Research Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, China)

Abstract: In order to meet the requirements of terahertz high-resolution detection and real-time processing, the photoconductive antenna is used to generate and detect terahertz time-domain spectral signals. Based on the field programmable gate array, the functions of terahertz time-domain spectrum acquisition, Wiener filtering deconvolution processing, transmission and host computer display are realized. The collected terahertz time-domain spectral data is subjected to Wiener filtering deconvolution processing to achieve the effect of restoring terahertz signals, improve time resolution and noise reduction. The data is transmitted to the host computer by Ethernet transmission for real-time display. In view of the wide pulse width after deconvolution of terahertz signals in actual detection, it is proposed to introduce a frequency-related function into the Wiener filtering deconvolution algorithm to optimize the algorithm, so that the pulse width of the signal becomes narrower and the detection accuracy is improved. Compared with the original algorithm, the signal-to-noise ratio of the optimized Wiener filter deconvolution algorithm is increased by 7 dB, the pulse width is reduced by 0.2 ps, and the higher detection resolution is realized. The algorithm is implemented in FPGA, the accuracy error is less than 0.7%, the processing efficiency is improved by 14.29 times, and the post-processing time of the host computer is reduced.

Keywords: Terahertz; field programmable gate array; signal acquisition; Wiener filtering deconvolution

收稿日期: 2023-05-22 Received Date: 2023-05-22

* 基金项目: 中山市第九批创新科研团队(GXTD2022010)、中山市第二批社会公益和基础研究项目(2022B2012)、吉林省自然科学基金项目(YDZJ202301ZYTS242)资助

0 引言

太赫兹波是指频率在 0.1 ~ 10 THz (波长在 0.03 ~ 3 mm) 范围内的电磁波^[1], 该频段介于毫米波与远红外光之间, 具有光子能量低、穿透性好、指纹谱特性等优点, 不同的分子结构对太赫兹的吸收与反射具有独特“指纹”识别谱, 在太赫兹频谱上表现为特征吸收峰, 可携带大量的光谱信息^[2-5]。太赫兹时域光谱系统 (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 是获取脉冲太赫兹光谱的重要手段, 在无损检测领域具有很高的应用价值^[6]。

目前, THz-TDS 装置正朝着便携性、小型化和高性能的方向发展, 很多研究人员都投入了大量的精力。徐咏等提出一种用于太赫兹光电导探测的高速直接数据采集系统, 相比传统 SR830 锁相放大系统的信号频域动态范围提高了 9 dB, 有效频谱宽度提高了 0.4 THz^[7]。黄战华等^[8]为了提高 THz-TDS 检测速度与精度, 设计了一种基于闭环控制的快速数据采集系统, 可实现最高 500 kHz 的数据采集, 单步连续采集 1 000 个数据点时间为 86.34 ms。Gao 等^[9]使用 FPGA 作为主控的单元, 实现了 THz-TDS 数据采集与控制系统的研制, 在 FPGA 内部实现了数字锁相放大器, 用于恢复微弱的太赫兹信号, 可在 10 s 内扫描 30 ps 时间窗内的波形, 谱分辨率优于 50 GHz, 动态范围达 49 dB。

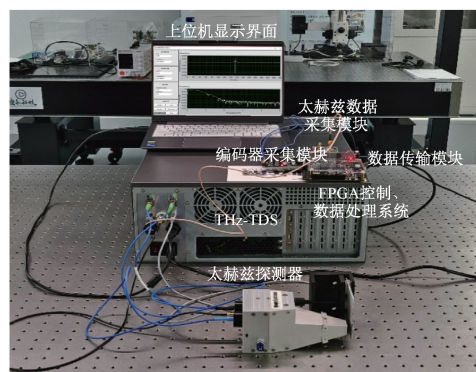
经光电导采样得到的太赫兹信号是入射脉冲和样品传递函数的卷积, 需要采用反卷积算法还原太赫兹信号, 提高时间分辨率^[10-11]。娄季琛等^[12]采用基于迭代收缩的反卷积滤波算法对太赫兹时域信号进行处理, 整形成了没有旁瓣的脉冲信号, 使得脉冲宽度变小, 提升了系统的时间分辨能力。Zhai 等^[13]使用频率-小波域反卷积对太赫兹信号进行厚度测定, 可以实现抑制高频和低频噪声, 可以更好的区分回波特征。涂婉丽等^[14]提出反卷积过程中的滤波在滤去噪声的同时也将信号的某些有用信息平滑掉了, 降低了检测精度, 采用多元回归分析方法提高太赫兹检测分辨率。

在实际应用中, THz-TDS 系统需要满足对太赫兹信号进行实时采集、处理与传输的需求, 实现对光谱信息的获取、还原时域信号与显示的功能。本文中采用 FPGA 对太赫兹采集处理传输系统进行模块化设计, 为了解决反卷积过程中会平滑有用信息, 对反卷积算法进行优化, 实现更高的检测分辨能力并针对实验参数进行进一步优化, 主要工作包括: 1) 采用 AD9238 与 AD7606 采集模块对太赫兹数据进行采集, 并通过 FPGA 进行时序控制, 满足了对太赫兹信号实时逐点采样的需求。2) 太赫兹采集信号中除了包含样件内部信息, 还含有光学系统以及空气层信息, 影响特征参数提取, 为了得到“纯净”的太赫

兹信号, 需要对采集到的信号进行处理, 本文采用 FPGA 实现对太赫兹信号的维纳滤波反卷积算法处理, 并对算法进行优化, 使得太赫兹信号的脉宽变窄, 实现了更高的检测分辨率。3) 通过网络传输的方式完成 FPGA 与上位机之间的信息交互, 采用用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 传输命令与太赫兹的波形数据等信息。

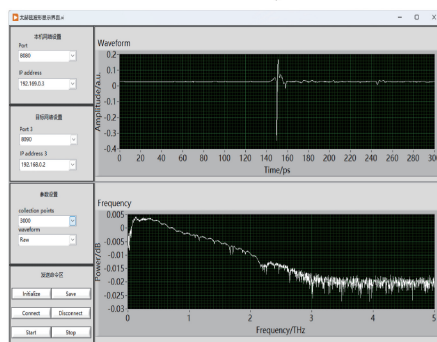
1 基于 FPGA 的太赫兹时域信号采集传输系统设计

为了满足太赫兹信号的采集传输功能需求, 本文将 FPGA 嵌入式设计应用于实验室自搭建的 THz-TDS 系统, 设计了一套如图 1(a) 所示的太赫兹时域信号采集传输系统, 上位机软件界面如图 1(b) 所示, 实现了对太赫兹探测器接收的回波信号进行采集、处理、传输与显示的功能。搭建的 THz-TDS 系统的时间扫描范围为 300 ps, 采样间隔为 0.1 ps, 扫描频率为 140 Hz, 高速时间延迟线的占空比为 42.5%。



(a) 太赫兹时域信号采集传输系统

(a) Terahertz time-domain signal acquisition and transmission system



(b) 上位机软件界面

(b) Upper computer software

图 1 系统总体设计

Fig. 1 General system design

基于 THz-TDS 的系统布局, 提出了如图 2 所示的

FPGA 内部模块设计方案,主要由 A/D 采集模块、数据处理模块、传输模块等组成,FPGA 中的内部模块是连接系统主要部件与应用软件的桥梁。采用 AD 采集模块对太赫兹探测器输出的太赫兹模拟信号与电机编码器输出的脉冲信号进行逐点采样,通过 FPGA 对采集模块进行时序控制,使用电机编码器输出脉冲 ABZ 相判断采集太赫

兹有用数据点,并将离散数据点整合成为太赫兹信号,存储在缓存器中,整合的太赫兹信号数据作为数据处理模块的输入,进行维纳滤波反卷积处理,达到还原太赫兹信号、提高时间分辨率以及降噪的效果,最后将处理完成的数据通过网络传输的方式从 FPGA 传输至上位机软件进行波形显示与分析。

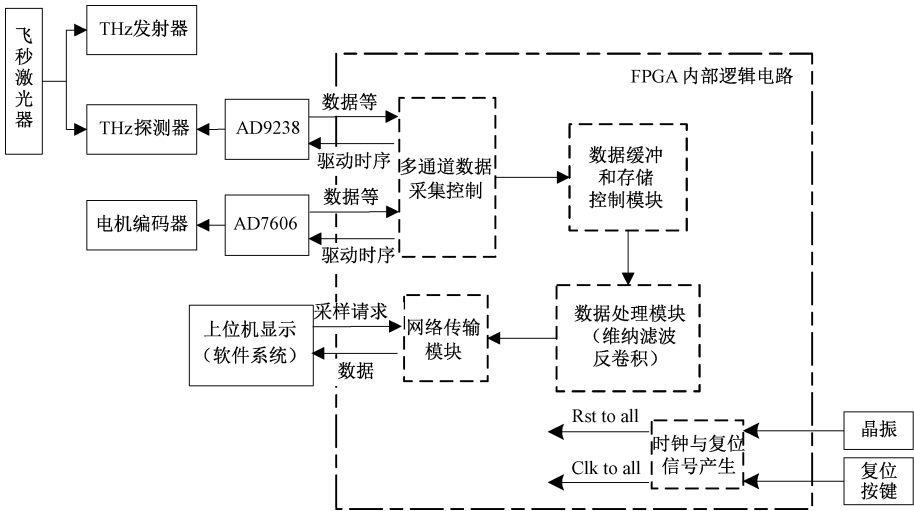


图 2 FPGA 内部模块设计
Fig. 2 FPGA internal module design

1.1 采集模块设计及实现

对于数据采集模块的设计,采集的精度越高,信号中包含的信息越丰富,还原度也就越高,AD 数据采集芯片决定采集的精度和分辨率,本文中选择 ADI 公司的 AD9238 芯片采集太赫兹信号,采样数据位数为 12 bit,经过转换包含 4 位有效数字。太赫兹发射器发射太赫兹脉冲经样件反射后被探测器接收,并由锁相放大器输出电信号,通过 A/D 转换电路将模拟信号转换为数字信号,同时也通过 AD7606 对编码器输出信号进行采集,判断太赫兹时域信号的采集起始过程。FPGA 完成对数据采集的时序控制以及使用交叉读写的方式将数据缓存在 RAM 中。根据式(1)设置 FPGA 的采样率 SR 为 1 MHz,通过截取 3 000 个点完成太赫兹波形的采集。

$$SR = \frac{M \times N}{DR}$$

(1)

式中:M 代表每秒钟采集波形个数;N 代表采样点数;DR 代表占空比。

采集控制时钟由分频逻辑电路产生,数据在时钟的上升沿采样,采样速率通过时钟分频得到,为了同步采集太赫兹以及编码器信号,对 4 路采样信号使用同一分频控制时钟,数据采集控制时序如图 3 所示,其中使能信号为控制 AD 采集起始标志,输入为太赫兹信号,AD 采集时钟为时钟分频得到的,数据输出为 AD 采集模块输出

的数据,将采集到的数据转换为电压值,并把电压值的每一位转换成 ASCII 码。

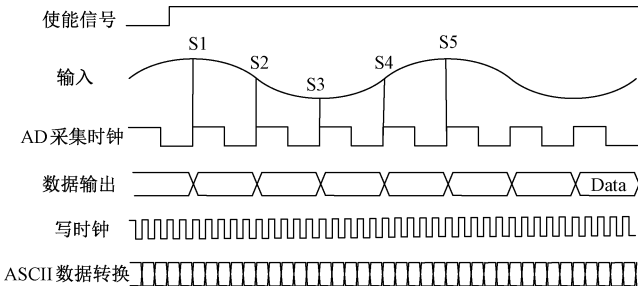


图 3 AD 采集控制时序
Fig. 3 AD acquisition control timing

1.2 传输模块设计及实现

本文中使用 UDP 协议完成网络传输模块设计,实现 FPGA 与上位机之间的信息交互,主要包括上位机向 FPGA 发送采集指令,FPGA 向上位机传输太赫兹采集数据信息,采用千兆 PHY 芯片 RTL8211E 实现网络数据通信,传输速率可达到 900 Mbps,满足对数据采集与处理的时间需求,在上位机软件使用 UDP 协议进行数据接收,通过在上位机设置本机与 FPGA 的端口号与 IP 地址来实现网络通信。

2 数据处理及其 FPGA 实现

维纳滤波技术是将太赫兹探测器接收到的时域待测信号与发射器发射的时域参考信号做反卷积的一种信号调制技术^[15-16]。假设经过样品反射后,太赫兹探测器接收到的太赫兹时域信号为 $y(t)$,太赫兹发射器发射的太赫兹时域信号为 $x(t)$,引入样品的传递函数 $h(t)$,则有:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

太赫兹探测器所观测到的信号为发射器发出的太赫兹脉冲在不同介质分界面的反射回波在时间上的叠加,是太赫兹脉冲与介质传递函数卷积的结果,能够反映材料内部的结构信息^[17-18]。在频域上,式(2)可写为:

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega) \quad (3)$$

样品的传递函数 $h(t)$ 可通过反卷积,再逆傅里叶变换,求得

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \left(Y(\omega) \frac{1}{X(\omega)} \right) \quad (4)$$

较小脉宽的太赫兹信号可以实现样品更高的检测分辨率^[19],然而在实际检测过程中,经过反卷积后的信号脉宽较宽,因此在传递函数中引入维纳滤波器,降低太赫兹脉冲脉宽,提高界面分辨率。维纳逆滤波的传递函数定义为 $W(\omega)$ 为:

$$W(\omega) = \frac{X^*(\omega)}{|X(\omega)|^2 + \gamma} \quad (5)$$

其中, $X(\omega)$ 是 $x(t)$ 的频域形式; $X^*(\omega)$ 表示 $X(\omega)$ 的复共轭; γ 为待测信号与噪声的功率比。为了方便计算,通常将 γ 的值假设是一个常数,然而在实际太赫兹检测中,不同材料的厚度以及吸收特性会发生改变,检测的太赫兹信号信噪比也会发生改变,在这种情况下选

择使用常数会导致滤波后的波峰较宽,辨识效果提高不明显。尤其对薄样件进行数据分析时,例如涂层材料,其厚度为微米量级,太赫兹波在样品中的传播时间较小,采集的信号是来自多个界面的反射信号的叠加,检测到的太赫兹时域波形中会出现因界面反射峰发生重叠而难以提取界面对应时间的情况^[20],难以对界面进行区分,因此本文提出优化维纳滤波反卷积算法,通过对得到的传递函数 $W(\omega)$,引入与频率相关的规整化函数 $\gamma(\omega)$ 代替待测信号与噪声的功率比,同时实现对高信噪比区域信号的增强,以及低信噪比区域的噪声抑制,并且可以提高对薄样品的检测精度。

本文构造如式(6)所示规整化函数 $\gamma(\omega)$:

$$\gamma(\omega) = \begin{cases} \log_p \left(\frac{|s_n(\omega)|}{|s_r(\omega)|} \right), & \omega_L \leq \omega \leq \omega_H \\ a, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

得到:

$$H(\omega) = \begin{cases} \frac{Y(\omega) \cdot X^*(\omega)}{|X(\omega)|^2 + \log_p \left(\frac{|s_n(\omega)|}{|s_r(\omega)|} \right)}, & \omega_L \leq \omega \leq \omega_H \\ \frac{Y(\omega) \cdot X^*(\omega)}{|X(\omega)|^2 + a}, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s_n(\omega)$ 表示噪声信号功率谱密度函数; $s_r(\omega)$ 表示待测信号功率谱密度函数; ω_L 表示低频截止频率; ω_H 表示高频截止频率; p 表示增益系数; a 表示 $\gamma(\omega)$ 在截止频率时的值。通过对 p 值的调节满足在低信噪比区域抑制噪声,保留更多的高信噪比区域的特征,通过对 a 值的调节满足对禁带频谱的抑制。

根据维纳滤波反卷积算法的原理,其在 FPGA 中的运算结构图如图 4 所示。

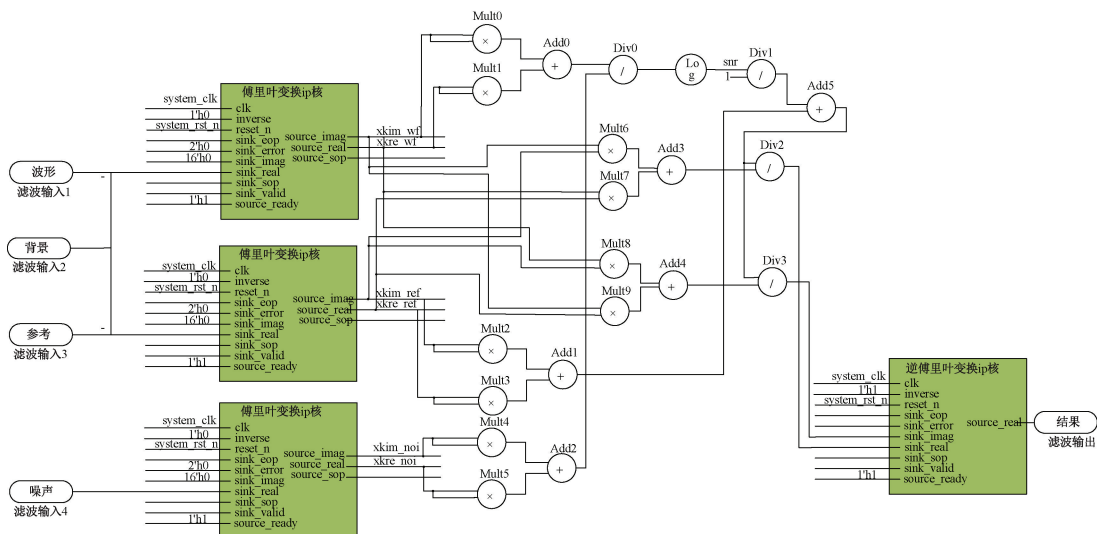


图 4 维纳滤波算法嵌入式设计结构

Fig. 4 Wiener filtering algorithm embedded design structure diagram

需要存储的数据包括输入待测信号数据,参考信号数据以及噪声信号数据。运算流程如下:首先通过对数据的寻址将存储的数据取出并格式转换为待计算数据,作为傅里叶变换的输入,使用 FFT 的 ip 核将时域信号转换到频域空间,输入第 1 个数据时,置位 sink_sop 为高电平,在整个输入数据期间,置位 sink_valid 为高电平,当输入到最后一个数据时,由于 FFT 需要计算 2 的指数次幂个数数据,在数据后面由 3 000 个数补 0~4 096 个数继续输入,在最后一个数据点的位置置位 sink_eop 为高电平,ip 核输出结果 xkre 与 xkim 分别代表傅里叶变换输出的频域数据的实部与虚部,根据式(6)使用输出的频域数据求取规整化函数的值,并根据式(7)计算的结果作为 IFFT 的输入数据,进行逆傅里叶变换,将频域信号转回时域分析,最后通过移位算法将特征峰移动到中间位置得到最终维纳滤波反卷积的结果。

3 实验验证

3.1 采集与处理信号质量分析

由于 FPGA 在常规运算时不能进行浮点运算,但是数据在进行计算过程中,难免会出现小数,造成误差。现有的太赫兹数据处理过程通常在软件中后期完成,计算精度较高。本文对随机采集到的 5 组太赫兹数据采用 FPGA 中优化的维纳滤波反卷积算法与在软件中使用优化算法进行处理,滤波结果的平方和信噪比对比结果如表 1 所示,相对误差低于 0.7%。

将上述方法封装为软核,分别在 Artix-7(XC7A35T)、Kintex-7(XC7K70T)、Zynq-7000(XC7020)FPGA 平台上进行实现。测试中使用相同的硬件环境,并保持锁封装 IP 组件驱动时钟一致。经综合、实现,3 种平台下包括逻辑单元、时钟分配单元在内的可编程逻辑资源占用均低于 30%,实现步骤的实际优化情况满足本方案的稳定运行需求。资源消耗情况对比表如表 2 所示。

表 1 FPGA 与软件维纳滤波算法结果信噪比对比
Table 1 Comparison of signal-to-noise ratio between FPGA and software Wiener filtering algorithm results

序号	软件处理结果 信噪比/dB	FPGA 处理结果 信噪比/dB	相对误差/%
1	23.46	23.61	0.64
2	23.40	23.49	0.38
3	23.52	23.44	-0.34
4	23.49	23.56	0.30
5	23.47	23.34	0.55

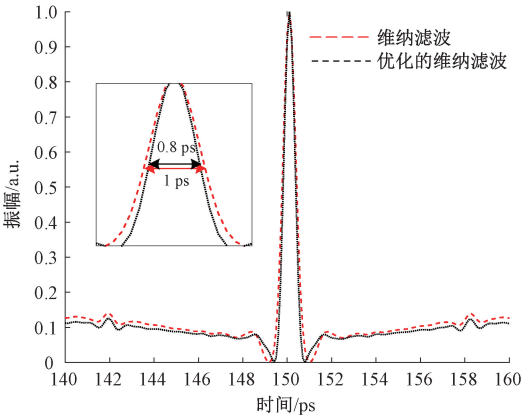
表 2 资源消耗情况对比表
Table 2 Comparative list of resource consumption

	Slice registers	Slice LUTs	DSP48Es	Memory/kB
Artix-7(XC7A35T)	2 078	3 240	13	180
Kintex-7(XC7K70T)	2 356	3 741	31	196
Zynq-7000(XC7020)	2 431	3 562	23	187

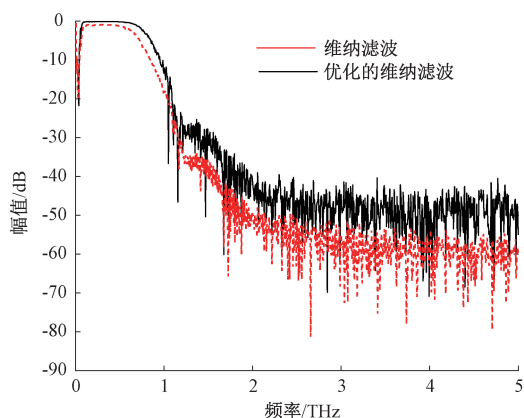
在上述实现中加入针对封装 IP 特征信号的观测信号,并将相关信号引出到外部电路板上。这些信号可以指示信号处理的起始、结束时刻,即其脉宽既为处理时间。使用具有 200 频率计数器对信号脉宽进行观测,典型处理时间为 0.07 ms,对比软件实现处理时间为 1 ms,实现了 14.29 倍的提升。同时,在测试结果中,各平台下的测得的速率数据较为接近,展示出本技术方案在不同 FPGA 器件条件下具有性能差异较小的特点。

3.2 两种维纳滤波算法对比

为了验证本文中提出的优化维纳滤波算法的优劣性,在本文设计的太赫兹采集系统中,分别使用传统的维纳滤波与优化的维纳滤波算法对金属板反射的太赫兹脉冲时域信号进行处理,并将滤波结果的最值差作为缩放因子进行归一化处理,方便在同一尺度下对两种算法的结果进行对比。太赫兹时域对比结果如图 5(a)所示,优化的维纳滤波算法相比于原始算法将太赫兹主脉冲的半波宽从 1 ps 降低到了 0.8 ps,能够达到更高的检测分辨能力。经过计算优化后的维纳滤波处理后的信噪比为 29 dB,原始维纳滤波处理后的信噪比为 22 dB,提升了 7 dB。并且从图中可以看出优化的维纳滤波算法处理结果的旁瓣更窄,可以更容易区分太赫兹时域光谱反射信号。太赫兹频域对比结果如图 5(b)所示,优化的维纳滤波算法在 1~2 THz 区间避免了原始滤波算法由于过度平滑导致的频谱损失,虽然动态范围变小了,但是对高频部分信号影响比较小,并且同样抑制了高频部分的噪声信息。



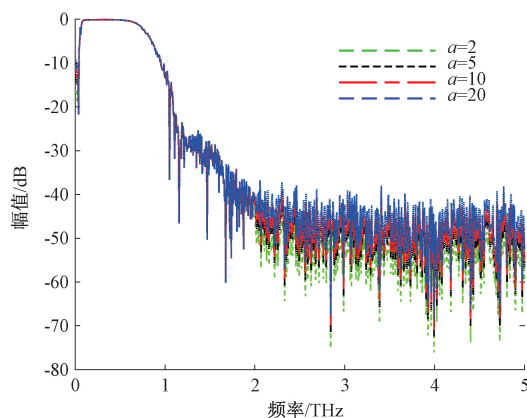
(a) 时域脉冲信号维纳滤波算法对比
(a) Comparison of Wiener filter algorithm in time domain pulse signal



(b) 频域脉冲信号维纳滤波算法对比
(b) Comparison of Wiener filter algorithm
for frequency domain pulse signal

图 5 维纳滤波算法对比

Fig. 5 Comparison of Wiener filtering algorithms



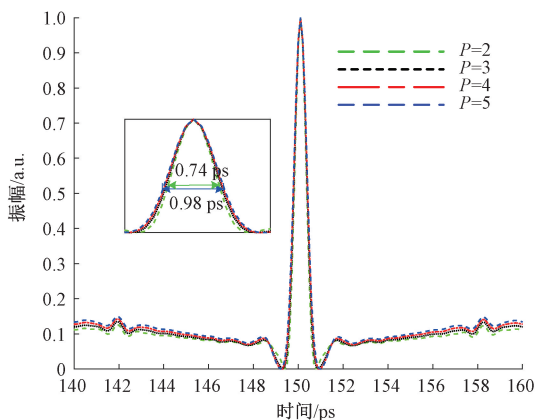
(b) 不同规范化因子 a 对频谱信号影响
(b) Influence of different normalization
factor a on spectral signals

图 6 不同增益系数 p 与规范化因子 a 对信号影响

Fig. 6 The influence of different gain coefficients p
and regularization factor a on the signal

3.3 增益系数 p 与参数 a 对太赫兹反卷积信号的影响

为了研究引入的与频率相关的函数中的增益系数 p 与参数 a 对滤波效果的影响,采用控制变量法分别观察对优化的维纳滤波反卷积算法的影响。保持参数 $a = 10$ 不变,分别对增益系数 p 赋值为 2、3、4、5,观测不同增益系数 p 对时域信号的影响,结果如图 6(a) 所示,随着 p 值的减小,太赫兹主脉冲信号的半高宽度从 0.98 ps 缩小到了 0.74 ps,但旁瓣深度随之增加,噪声不断增强,在选用参数时需要考虑增强信号分辨能力的同时,也需要考虑平衡旁瓣带来的损失。保持增益系数 $p = 2$ 不变,因为 a 值变化较小时,结果不明显,因此本文中分别对参数 a 赋值为 2、5、10、20,观测不同系数 a 对频域信号的影响,结果如图 6(b) 所示,随着 a 的增大,在 2~5 THz 之间,频谱衰减的陡度不断增加,抑制噪声的能力不断增强,其效果等效于带通滤波器。



(a) 不同增益系数 p 对时域信号影响
(a) Influence of different gain coefficient p
on time domain signal

4 结 论

本文实现了太赫兹时域光谱采集传输的嵌入式设计与优化,针对太赫兹数据实时在线监测需求,将 FPGA 与 THz-TDS 相结合,实现了太赫兹实时在线的采集、处理与传输功能的稳定运行需求,经综合、实现,包括逻辑单元、时钟分配单元在内的可编程逻辑资源占用低于 30%,并且与软件实现信号处理算法相比,效率提高了 14.29 倍。为了提高太赫兹检测的时间分辨率,对维纳滤波反卷积算法进行了优化,将算法中的规范化参数修改为与频率相关的函数,在还原太赫兹信号的同时实现了降噪的功能,相比于原始维纳滤波算法处理的结果半波宽从 1 ps 降低到了 0.8 ps,实现了更高的检测分辨能力,信噪比从 22 dB 增加到 29 dB,具有更窄的旁瓣,更容易区分太赫兹时域光谱反射信号,提高了太赫兹时域信号的纵向分辨率,为复合材料内部缺陷的高精度检测提供技术保障。

参考文献

- [1] 江雪雷,许颖. 利用太赫兹时域光谱对覆盖层下钢板锈蚀厚度的无损检测[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 76-83.
JIANG X L, XU Y. Nondestructive testing of steel plate rust thickness under cover layer using Terahertz time domain spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 76-83.
- [2] 李迎,张朝晖,赵小燕,等. 非金属涂层缺陷的太赫兹时域谱检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 129-136.

- LI Y, ZHANG ZH H, ZHAO X Y, et al. Terahertz time domain spectral detection of nonmetallic coating defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 129-136.
- [3] 赵磊, 王远, 周南, 等. 太赫兹光谱识别木材的影响因素研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 161-167.
- ZHAO L, WANG Y, ZHOU N, et al. Study on the factors influencing the identification of wood by terahertz spectroscopy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 161-167.
- [4] 林定君, 臧元章, 刘素芳, 等. 基于 USB 的 TDS 电路设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12): 187-191.
- LIN D J, ZANG Y ZH, LIU S F, et al. Design of TDS circuit based on USB [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(12): 187-191.
- [5] HUANG S, DENG H, WEI X, et al. Progress in application of terahertz time-domain spectroscopy for pharmaceutical analyses[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11.
- [6] NSENGIYUMVA W, ZHONG S, ZHENG L, et al. Sensing and non-destructive testing applications of terahertz spectroscopy and imaging systems: State-of-the-art and state-of-the-practice [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023.
- [7] 徐咏, 邱亮, 古东才, 等. 一种直接数据采集的太赫兹时域光谱快速扫描系统研究[J]. 光学技术, 2022, 48(6): 703-709.
- XU Y, QIU L, GU D C, et al. Research on a terahertz time-domain spectroscopy fast scanning system for direct data acquisition [J]. Optical Technology, 2022, 48(6): 703-709.
- [8] 黄战华, 胡子晓, 何明霞, 等. 基于闭环控制的太赫兹时域光谱快速采集[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 50-57.
- HUANG ZH H, HU Z X, HE M X, et al. Fast acquisition of terahertz time-domain spectroscopy based on closed-loop control [J]. Laser and Optonics Progress, 2015, 52(4): 50-57.
- [9] GAO W, WANG Y, ZHAO Z. Development of the data acquisition and control system for a portable THz time-domain spectrometer [C]. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013; Terahertz Technologies and Applications. SPIE, 2013, 8909: 138-143.
- [10] ZHAI M, LOCQUET A, ROQUELET C, et al. Nondestructive measurement of mill-scale thickness on steel by terahertz time-of-flight tomography [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393: 125765.
- [11] LEI T, YANG S Y, TOBIN B, et al. A measurement framework using THz time-domain sensing for wood quality assessment across tree ring samples [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107437.
- [12] 娄季琛, 张岩. 基于机器人的太赫兹层析成像系统[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(4): 83-88.
- LOU J CH, ZHANG Y. Robot-based terahertz tomography system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(4): 83-88.
- [13] ZHAI M, LOCQUET A, CITRIN D S. Pulsed THz imaging for thickness characterization of plastic sheets [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102338.
- [14] 涂婉丽, 钟舜聪, 罗曼婷, 等. 薄厚度有机防护涂层的太赫兹无损检测与多元回归分析[J]. 测控技术, 2021, 40(11): 96-101.
- TU W L, ZHONG SH C, LUO M T, et al. Terahertz non-destructive testing and multiple regression analysis of thin thickness organic protective coatings [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(11): 96-101.
- [15] WANG B, LIU H, ZHU X Y, et al. A novel method to process the THz time-domain spectrum and software to make data visualization [C]. 2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS), Shenyang, China, 2020: 186-188.
- [16] 任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹时域光谱反射式层析成像技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 185-190.
- REN J J, LI L J, ZHANG D D, et al. Terahertz time-domain spectroscopy reflective tomography technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 185-190.
- [17] TU W, ZHONG S, ZHANG Q, et al. Quality evaluation of organic protective paints using terahertz pulse imaging technology based on wavelet packet energy method [J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113282.
- [18] WU D, HAUDE C, BURGER R, et al. Application of Terahertz time domain spectroscopy for NDT of oxide-ceramic matrix composites [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 102995.
- [19] XU Z P, LI L J, REN J J, et al. Nondestructive testing of rubber materials based on the reflective terahertz time-domain spectroscopy [C]. 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Beijing, China, 2017: 1-4.
- [20] XU Y, WANG X, ZHANG L, et al. Terahertz nondestructive quantitative characterization for layer

thickness based on sparse representation method [J].
NDT & E International, 2021, 124: 102536.

作者简介



张丹丹 (通信作者), 2012 年于长春理工大学获得学士学位, 2015 年于长春理工大学获得硕士学位, 2020 年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师, 博士/硕士生导师, 主要研究方向为复合材料太赫兹无损检测与评估技术、先进复合材料无损检测。

E-mail: zhangdandan_rita@126.com

Zhang Dandan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2012, M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2015 and Ph. D. degree from Changchun

University of Science and Technology in 2020, respectively. Now she is a lecturer, doctoral/master's supervisor in Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include terahertz non-destructive testing and evaluation technology for composite materials and advanced non-destructive testing for composite materials.



李璐璐, 2021 年于长春理工大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测。

E-mail: 18943031030@163.com

Li Lulu received her B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in Changchun University of Science and Technology. Her main research interest includes terahertz non-destructive testing.